

Wasserstoff aus Elektrolyse

Energetische Betrachtungen und Vergleiche mit fossilen Brennstoffen

31.01.2020 Dr. Benno Ganser, FDP Mainz-Bretzenheim

1. Ausgangspunkt

Gegenstand der Betrachtung ist die politische Bewertung der Herstellung von Wasserstoff aus Elektrolyse von Wasser. Diese beruht in dem vorliegenden Papier sowohl auf den Ergebnissen des Energieparks Mainz-Hechtsheim als auch auf Literaturdaten der herkömmlichen Herstellung fossiler Brennstoffe wie Erdgas und Diesel, sowie der Herstellung von Wasserstoff aus Synthesegas. Die Umrechnungen basieren auf chemisch-physikalischen Kenndaten der Stoffe bzw. Stoffgemische. Der Vergleichbarkeit wegen sind die Energieinhalte der verschiedenen Stoffe bzw. Stoffgemische in kWh angegeben.

2. Energiepark Mainz-Hechtsheim

Diese Anlage ist eine [Pilotanlage \(1\)](#) zur Herstellung von Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser. Der erforderliche Strom wird aus Windrädern bereitgestellt. Die moderne Anlage beruht auf einer neuen sog. PEM Elektrolyse. Laut Siemens kann mit einem [Systemwirkungsgrad \(2\)](#) von ca. 80% ausgegangen werden. D.h., dass 80% des eingesetzten Stroms als Heizwert des gewonnenen Wasserstoffs zur Verfügung steht. In Zahlen:

Mögliche Dauerleistung der Anlage:	2 x 1,3 MWe
Heizwert (3) von Wasserstoff:	33,3 kWh/kg
Mögliche Wasserstoffproduktion:	62,5 kg/h = 694 Nm ³ /h

Bei handelsüblichen Preisen für Wasserstoff von ca. 3 €/kg kann die Anlage im Dauerbetrieb einen Tagesumsatz von ca. 4500 € erreichen, bei einem Energieaufwand von min. 62,4 MWh. Damit kann die Anlage nur dann wirtschaftlich betrieben werden, wenn der Strompreis nicht höher als 7 Cent / kWh beträgt. Dies ist bei üblichen [Großhandelspreisen \(4\)](#) in Europa (3 – 6 Cent / kWh Spotmarkt) möglich. Allerdings ist in diesem Vergleich der Anteil der Investitionskosten bzw. Abschreibungen nicht berücksichtigt.

3. Herstellung von Wasserstoff mittels Synthesegas

Dies ist derzeit die meistverbreitete Herstellungsmethode von Wasserstoff. Ausgangsprodukt ist Erdgas (Methan), das mit Wasser und Energie in einer endothermen Reaktion zu CO und H₂ umgesetzt wird.



Der rein chemische Energiebedarf ist ca. 10 kWh pro kg erzeugtem Wasserstoff. Der tatsächliche Aufwand liegt bei neuen Verfahren wie beispielsweise [autotherme Reformer \(5\)](#) nicht viel höher, entsprechend der veröffentlichten Kennzahlen:

- Ausbeute: min. 2,5 Nm³ Syngas / Nm³ Erdgas (einschließlich Brennstoff)
- Dem entsprechen min. 0,8 kg H₂ pro kg Erdgas (Methan)
- [Heizwerte \(6\)](#): 33,3 kWh/kg (H₂) vs. 10 kWh/kg (Methan)
- Energieaufwand: max. 12,5 kWh /kg H₂

Damit ist die Energiebilanz eindeutig positiv, d.h. der energetische Wirkungsgrad ist fast 300% in Bezug auf die eingesetzte Energie.

4. Vergleiche mit Erdgas und Diesel als Brennstoffe

Die [Förderung und Verteilung von Erdgas wie Erdöl \(7\)](#) kostet natürlich ebenfalls Energie. Der gesamte Aufwand wird seitens der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) auf 0,4% bei Erdgas und 0,8% bei Erdöl geschätzt.

Bei Erdöl muss allerdings der Aufwand für die Raffinierung und Aufbereitung zu einem verwendbaren Kraftstoff wie Diesel eingerechnet werden. Die [Deutsche Energie-Agentur \(8\)](#) berechnet dafür einen gesamten Aufwand (well-to-tank) von ca. 8,7% pro l verbrauchten Diesel. Diesel hat einen [Heizwert \(3\)](#) von ca. 9,5 kWh/l, d.h. der Aufwand zu dessen Förderung und Herstellung ist damit ca. 0,8 kWh.

Daraus ergeben sich folgende energiebezogene Zahlen:

100 kWh investiert in Bereitstellung von Erdgas resultieren in 25000 kWh Heizwert
 100 kWh investiert in Bereitstellung von Diesel resultieren in 1150 kWh Heizwert

5. Wasserstoff als Treibstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen

Brennstoffzellenmotoren sind bereits Stand der Technik. Sie werden mit Wasserstoff betrieben und haben im Vergleich zu Ottomotoren einen sehr guten [Wirkungsgrad \(9\)](#), in der Praxis werden 70 % erreicht. Auch die modernsten Dieselmotoren kommen dagegen nicht über 40%. Dazuzurechnen ist allerdings der [Aufwand zur Kompression \(10\)](#) des Wasserstoffs, um ihn in einem Fahrzeug nutzen zu können. Man muss hier ca. 12% des Energieinhalts des Wasserstoffs hinzurechnen. Wird der Wasserstoff aus Elektrolyse wie in MZ-Hechtsheim gewonnen, so wäre ein gesamter Wirkungsgrad (Strom zur Elektrolyse bis Rad) ca. 49%.

6. Energieaufwand beim Betrieb von reinen Elektrofahrzeugen

Der Energieaufwand beim Betrieben von Elektroautos setzt sich zusammen aus dem mechanischen [Wirkungsgrad des E-Fahrzeugs \(11\)](#) von ca. 54%, der auch den Verlust beim Laden der Batterie (bis 20% bei Schnellladestationen) und sämtliche Nebenverbraucher (ca. 20%, wie Heizung oder Klimaanlage, Motor, etc.) mit einschließt, und dem Aufwand zur Batterieherstellung. Vom Energieaufwand für die gesamte Herstellung von Batterien gibt es bis heute keine verlässlichen Zahlen, lediglich einen Zeitungsbericht in der [ZEIT \(12\)](#), der von 125 kg CO₂ pro kWh Batteriekapazität spricht. Dies wäre allerdings ein erheblicher Aufwand, der den Wirkungsgrad fast halbieren würde. Wegen des Fehlens verlässlicher Zahlen wird dies hier nicht betrachtet, wie auch der Energieaufwand zur Herstellung eines PKW oder

einer Brennstoffzelle nicht betrachtet wird. Eine grobe Überschlagsrechnung ist im Anhang auf Seite 4 aufgeführt.

7. Zusammenfassung

Bei einem Energieaufwand von 100 kWh ist die Energieausbeute bei

- Wasserstoff aus Elektrolyse (E-Park Hechtsheim): 80 kWh
- Wasserstoff aus Synthesegas: 260 kWh
- Diesel aus Erdöl: 1150 kWh
- Erdgas 25000 kWh

Bei einem Energieaufwand von 100 kWh für ein Fahrzeug kommen an den Rädern an:

- Dieselmotor 36 kWh
- Elektromotor / Akku 54 kWh
- Brennstoffzellenmotor 49 kWh

Mit einem mechanischen Energiebedarf von 25 kWh pro 100 km Fahrstrecke benötigt man mit

- Dieselmotor 69,4 kWh → 9,50 € (7,3 l; 1,3 €/l, 9,5 kWh/l Heizwert)
- Elektromotor (Akku) 46,3 kWh → 13,89 € (Strom 0,3 €/kWh; 2,88 bei 6 C/kWh)
- Brennstoffzellenmotor 51,0 kWh → 4,60 € (3 €/kg H₂, 33,3 kWh/kg Heizwert)

8. Schlussfolgerungen

- Die Herstellung von „grünem“ Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser mittels überschüssigem Ökostrom ist im Vergleich mit der Elektromobilität sehr sinnvoll.
- Die energetischen Wirkungsgrade bei Fahrzeugen mit Batterie verglichen mit Brennstoffzellen sind vergleichbar
- Wenn man Spotmarktpreise für den Elektrolyse-Strom unterstellt, erscheint grüner Wasserstoff wirtschaftlich.
- Damit ist zu fordern, dass die Herstellung grünen Wasserstoffs aus überschüssigem Windstrom von Abgaben befreit sein muss.

9. Ausblick

Grüner Wasserstoff aus Ökostrom als Substitut für fossile Brennstoffe ist durch die o.g. Ausführungen eine naheliegende Idee. Allerdings muss man, bei einer vollständigen Substitution von fossilen Energieträgern die gesamte Energiebilanz betrachten. Will man [sämtliche fossilen Energieträger \(13\)](#) durch Elektrizität bzw. durch Wasserstoff aus Elektrolyse ersetzen, dann sind das in Deutschland derzeit 1750 TWh pro Jahr. Im Vergleich dazu ist der gesamte deutsche [Stromverbrauch \(14\)](#) bei 520 TWh pro Jahr. **Eine geschlossene Nicht-Fossile Energiewirtschaft benötigt eine Steigerung der Stromerzeugung um 300%! Diese Zahl wird auch durch die etwas höheren Wirkungsgrade von z.B. Brennstoffzellenfahrzeugen nicht wesentlich geringer. Es setzt einen starken Zuwachs an Kraftwerkskapazität voraus, mit entsprechenden sehr hohen Kosten von ca. 15% des deutschen BIP (siehe Anhang).**

Politische Schlussfolgerungen und Kernaussagen:

- Die FDP bekennt sich eindeutig für eine Energiewende hin zu nicht-fossiler Energieerzeugung
- Für die Entwicklung einer nicht-fossilen Energiewirtschaft ist Wasserstoff eine unerlässliche Quelle.
- Als Ersatz für fossile Treibstoffe ist Wasserstoff die einzige Alternative mit einem global niedrigen CO₂ „Footprint“. Denn die heutigen Technologien zur Herstellung von PKW Akkus erzeugen große Umweltschäden bei der Rohstoffgewinnung und führen zu hohem Energieverbrauch und schneller globaler Ressourcen-Knappheit
- Die Entwicklung von Technologien zur Herstellung von „grünem“ oder „blauen“ Wasserstoff sowie eine flächendeckende Wasserstoff-Infrastruktur sind zu fördern. Dazu zählt beispielsweise die Initiative der deutschen Gasnetz-Betreiber und die Entwicklung PKW-tauglicher Brennstoffzellen (Bosch, Daimler)
- Heutige Technologieansätze wie die PEM Elektrolyse können bei geeigneten Rahmenbedingungen wirtschaftlich betrieben werden, allerdings nur, wenn der dafür erforderliche Strom ohne Abgaben und Gebühren bezogen werden kann
- Die Voraussetzungen zum schnellen Ausbau von „Power-to-Gas“ Stationen ist zu fördern
- Alle Maßnahmen zum Erreichen einer nicht-fossilen Energieerzeugung werden allerdings nicht ohne einen massiven Ausbau der Elektrizitätserzeugung möglich sein. Dies ist klar zu kommunizieren, und eine entsprechende Strategie zum Umstieg muss erarbeitet werden, um Versorgungslücken zu vermeiden.

Anhang:

A. Energiebilanz eines Elektroautos unter Berücksichtigung der Batterieherstellung

Ausgangszahlen sind folgende:

- | | |
|---|----------------------------------|
| - CO ₂ -Äquivalent der Herstellung von Auto-Akkus: | 125 kg CO ₂ pro kWh |
| - Aufwand für einen typischen Akku von 40 kWh: | 5000 kg CO ₂ pro Akku |
| - Dem entsprechen (CH ₄ → CO ₂): | 1800 kg CH ₄ |
| - Heizwert dieses CH ₄ bzw. Erdgas: | 50 MJ/kg |
| - Damit ist der Gesamtenergiebedarf: | 1800 x 50 = 90.000 MJ = 25 MWh |
| - Verteilt auf 100.000 km Fahrstrecke: | 25 kWh / 100 km |

Kommentar:

Damit wäre der tatsächliche Energieaufwand pro 100 km Fahrstrecke für ein E-Auto fast 50% höher, und der Gesamtwirkungsgrad wäre geringer als beim Dieselmotor.

B. Volkswirtschaftliche Belastung durch den Zubau von Kraftwerkskapazität für eine geschlossene Wasserstoffwirtschaft:

Ausgangszahlen sind folgende:

- Zusätzlicher Strombedarf durch Substitution fossiler Energieträger: 1750 TWh/a
- Zahl der Stunden pro Jahr (24 x 365) 8760 h
- Ein Windrad mit ca. 1 MW Dauerleistung (offshore) erzeugt: 8,76 GWh/a
- Für den o.g. Strombedarf muss man eine Kraftwerkskapazität Installieren von (1,75 Mio / 8,76 GWh) 199700 MW
- [Investitionskosten \(15\)](#) einer Offshore-Windkraftanlage 2,5 Mio €/MW
- **Erforderliche Investitionssumme ist damit 500 Mrd. € = 0,5 Bio €**
- **Das deutsche BIP ist 3,4 Bio. €**
- **Der gesamte Bundeshaushalt 2020 ist 0,36 Bio. €**

Kommentar:

Wie genau die Zahlen auch sein mögen, so ist evident, dass eine komplette geschlossene Wasserstoffwirtschaft unser Land ca. 15% der gesamten Wirtschaftsleistung kosten wird, bzw. das 1,4 fache des gesamten Bundeshaushalts. Eine Installation einer solch hohen Stromerzeugungskapazität ist nur in langen Zeiträumen und mit hohem volkswirtschaftlichen Aufwand, bzw. Einbußen an Lebensstandard, möglich.

Es kann auch keine Rede von ausreichender Versorgung durch „Überschuss“-Produktion der Windkraft sein. Selbst wenn der gesamte deutsche Windpark (56 GW) über 10 Nachtstunden das gesamte Jahr nur Wasserstoff produzierte, wäre das Ergebnis lediglich 155 TWh. Das sind aber weniger als 10% des theoretischen Bedarfs.

C. Telefonat mit Fabio Ruggeri, Wood Group (ehem. Foster Wheeler Italiana), Spezialist für Wasserstoff-Technologie

- FW arbeitet an einer Reihe von verschiedenen Techniken zur Emissions-armen Wasserstoffherzeugung:
 - (a) „blauer“ Wasserstoff, d.h. konventionell mit CO₂ Abscheidung
 - (b) Biologisches Ethanol zu Wasserstoff
 - (c) Konventionelles Steam Reforming mit Biogas statt Erdgas
 - (d) Konversion von Polyglykolen (Abfallprodukt Biodiesel) zu Wasserstoff
 - (e) Elektrolyse von Wasserstoff

Alle diese Verfahren sollten genutzt werden, wo auch immer sinnvoll.

- Preis des grünen Wasserstoffs hängt sehr stark von der Infrastruktur ab. Idealfall wäre ein geschlossenes Netzwerk an Leitungen (grid) in das man immer dann Wasserstoff einspeisen könnte wenn auch immer ökologischer Strom erhältlich wäre. Ansonsten wäre die CO₂ Bilanz sehr schlecht, im Vergleich zu konventionell erzeugtem Wasserstoff
- Reine Elektrolyse, kontinuierlich, ohne Infrastruktur → Kosten bis 15 €/kg
- Reine Elektrolyse, optimiert, mit bester Infrastruktur: Kosten 4 – 6 €/kg.
- Heutige Preise liegen bei ca 2 €/kg, die wären mit Diesel konkurrenzfähig. Das heißt, dass grüner Wasserstoff in jedem Fall teurer sein wird als konventioneller, auch bei bestmöglichen Bedingungen
- Basis dieser Bedingungen ist ein Strompreis von 40 – 60 €/MWh, d.s. 4 – 6 Cent pro kWh – in jedem Fall erheblich billiger als jeder Haushaltsstrom
- Wenn Heizen, dann auf keinen Fall mit grünem Wasserstoff, das wäre energetisch viel zu schlecht (max 80% Wirkungsgrad). Dann sollte man direkt mit Strom Heizen (Wirkungsgrad >> 90%)
- Wasserstoff-Infrastruktur ist das sinnvollste Investment derzeit. In vorhandene Erdgasleitungen lässt sich bis ca. 8%, max. 10% Wasserstoff einspeisen, ohne große Nachteile bzw. Gefährdungen (Wasserstoff diffundiert erheblich durch Leitungen, Dichtungen etc. Explosionsgefahr! Brennwert ist deutlich über dem von Erdgas: Höhere Temperaturen, Schädigungen an Brennern, Heizungen, etc.)

Referenzen:

Die Referenzen sind als Links in den Text elektronisch integriert und farblich gekennzeichnet.

- (1) www.energiepark-mainz.de
- (2) Dr. Philipp Lettenmeier, Siemens AG | Wirkungsgrad –Elektrolyse | White Paper, Januar 2019
- (3) www.hho-generator.de/vergleich-wasserstoff/wasserstoff-heizwert-vergleich - (Fa. Kema GmbH, München)
- (4) Börsenstrompreis am EPEX-Spotmarkt* für Deutschland/Österreich bzw. Deutschland/Luxemburg von Oktober 2018 bis Oktober 2019 (de.statista.com)
- (5) Air Liquide - Autotherme Reformierung – Synthesegaserzeugung (<https://www.engineering-airliquide.com/de/autotherme-reformierung-synthesegaserzeugung>)
- (6) Wikipedia – Heizwerte (<https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert>)
- (7) Energiebilanz der Erdöl- und Erdgasgewinnung in Deutschland; Dr. Michael Kosinowski; BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, HANNOVER (BGR)
- (8) Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix; Deutsche Energieagentur
- (9) Brennstoffzelle und Wasserstoff – Elektromobilität; Energieagentur NRW
- (10) H2orizon – Mobilität (<https://www.h2orizon.de/die-anwendung/mobilitaet-wasserstoff-als-kraftstoff.html>)
- (11) Reale Fahrversuche für Elektrofahrzeuge; 14.06.2019; DeWe Soft Messdaten-Erfassungssysteme
- (12) So sauber ist das Elektroauto; ZEIT Online, 2014 - 01
- (13) Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen; Umweltbundesamt 27.09.2019
- (14) Stromverbrauch; Umweltbundesamt; 27.09.2019
- (15) WAB e.V.; Fragen und Antworten zur Offshore-Windenergie, Kap. 17, „Was kostet eine Offshore-Windenergieanlage?“